

高耐力ロックボルト材料の引抜特性に関する研究

COMPARATIVE TESTS OF THE VARIOUS ROCKBOLTS

吉塚 守¹⁾ 三谷浩二²⁾ 城間博通³⁾

Mamoru YOSHIZUKA, Koji MITANI and Hiromichi SHIROMA

For obtaining the basic data of anchoring behavior of rockbolts, these data were used for revising the design manual and quality control manual of the JH (The Japan Highway Public Corporation), we performed pull-out tests both in laboratory and in-situ for a number of different types of rockbolts, such as high-strength rockbolts, high-tension cablebolts and new materials like carbon fiber or aramid fiber. From the results of these tests, we clarified characteristics of anchoring behavior for the various rockbolts and proposed a new guide line for the quality control of rockbolts.

Key words: Tunnel, Rockbolt, Anchoring behavior, Quality control

1. はじめに

トンネルの支保工として施工されているロックボルト工の使用材料について、日本道路公団(以下単にJHと記す)に於いては、異形棒鋼、ネジ節異形棒鋼、ねじり棒鋼とし、このうち長さ4m以上のものについては、耐力170kN(18tf)以上で施工性等よりねじり棒鋼を使用するもの(土木工事共通仕様書¹⁾、耐力その他の規定含)とされているが、標準支保パターンD I-a(設計要領第三集、第9編トンネル²⁾)で使用する長さ3m耐力170kN(18tf)のものについては、ネジ節異形棒鋼の使用が認められており、長さ別・材料種別ごとの施工特性(特に定着材の性状およびボルト表面特性による施工性および定着状況)を把握しておく必要がある。

また、第二東名・名神で計画されている大断面トンネルの掘削にあたっては、支保構造の成否がトンネル施工における決め手となるとの見地から、高耐力ロックボルトや高張力ケーブルボルトの試験施工等、様々な検討が

なされており、ロックボルト工の施工品質確認は必要不可欠なものとなっている。

本文は、ロックボルト工の設計・施工管理要領³⁾改定の基礎資料を得ることを目的として、JH試験研究所において実施した模擬岩盤を用いた引抜特性試験(室内)の結果とJH東京建設局上野原工事事務所で実施した実際の長さ別・定着材の性状別による比較検証試験とを比較し、ロックボルト工施工後初期の作用効果発現時期等の推定結果を報告し、ロックボルト工の品質管理向上の一助とするものである。

2. 試験概要

2.1 引抜特性試験(室内)

試験研究所における引抜特性試験(室内)は、現行のロックボルト(耐力18tf程度以下をいう。)材料と、高耐力ロックボルト(耐力20tf程度以上をいう。)や高張力ケーブルボルト等の新材料の材料特性および、定着材料の品質特性等に着目した室内試験を実施し、

1) 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室

2) 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室 主任

3) 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室 室長

二車線トンネルおよび大断面トンネルのロックボルト工の所要品質・設計、施工管理手法確立のための基礎資料を得ることを目的として、模擬岩盤（ $\sigma=28=40\text{N/mm}^2$ 程度）を用い以下に示す試験⁴⁾を実施した。

(1)試験箇所：東京都 町田市（JH試験研究所内）

(2)試験日時：試験用ロックボルト打設

平成 9 年 11 月 17 日（水）

～12 月 19 日（金）

引抜特性試験（試験材令）

打設後 3hr, 6hr, 12hr, 1 日、3 日、
（7 日、28 日）

(3)試験内容：ロックボルト埋込み長 35 cm、

ロックボルト材質 10 種類、

定着材性状 2 種類（フロー値⁵⁾

$180\pm 20\text{ mm}$, $150\pm 20\text{ mm}$ ）、

各 3 本ずつ 計 195 本

(4)試験項目：a. JHS705 ロックボルトの引抜試験⁶⁾

b. 定着材流動性試験（フロー試験）、

c. 定着材強度試験、

d. コア抜き試験 他

試験の状況を写真-1 に示す。

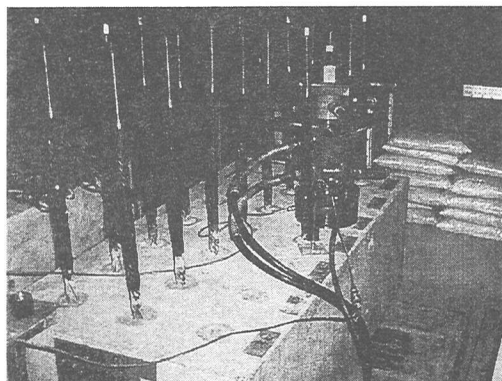


写真-1 引抜特性試験(室内)状況

2. 2 比較検証試験

上野原(工)における比較検証試験は、定着長 35 cm で実施された引抜特性試験(室内)と、現場における実物大の長さを用いた試験を比較することにより、定着の長さによって定着状況にどの程度の差異が生じる得るか(寸法効果)を確認しておく必要があることから、

現場で実際のロックボルト材料・定着材を用いて下半切羽（新第三紀中新世の安山岩で地山等級C I²⁾）にロックボルトを打設し、以下に示す試験を実施した。

(1)試験箇所：中央自動車道（改築）新岩殿トンネル
工事 現場内(下半切羽)

(2)試験日時：平成 10 年 8 月 18 日（火）

～平成 10 年 8 月 19 日（水）

試験材令

打設後 3hr, 6hr, 12hr, 1 日

(3)試験内容：ロックボルト埋込み長 3m, 4m、

ロックボルト材質 5 種類、

定着材種別 2 種類（普通・早強）

定着材性状 フロー値 $150\pm 20\text{ mm}$

各 3 本ずつ 計 48 本

(4)試験項目：a. JHS705 ロックボルトの引抜試験、

b. 定着材流動性試験（フロー試験）、

c. 定着材強度試験、. 他

試験の状況を写真-2 に示す。

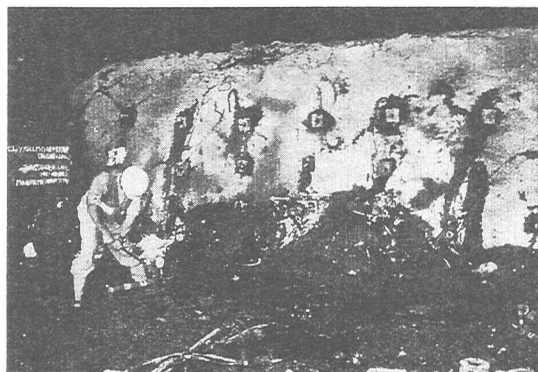


写真-2 比較検証試験状況

3. 試験結果

3. 1 引抜特性試験(室内)結果

引抜特性試験(室内)の内、材令 12 時間における試験結果について変位と荷重の関係をボルト種別ごとに整理したものを図-1(鋼材)、図-2(新素材)、各材令で得られた定着材の圧縮強度と引抜試験によって得られた引抜耐力の関係をボルト種別ごとに整理したものを図-3(鋼材関係)、図-4(新素材関係)に示す。

なお、各図に記号(CH1～CH11)で示したボルト種別と定着材の種類、性状を表-1に示す。

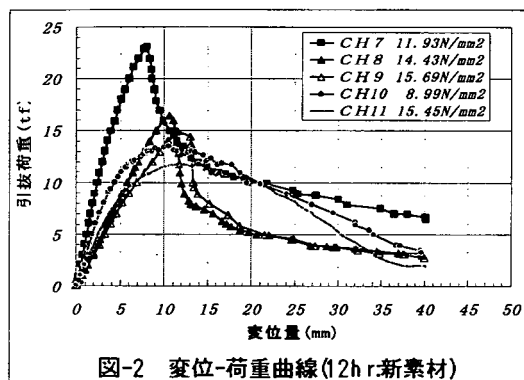
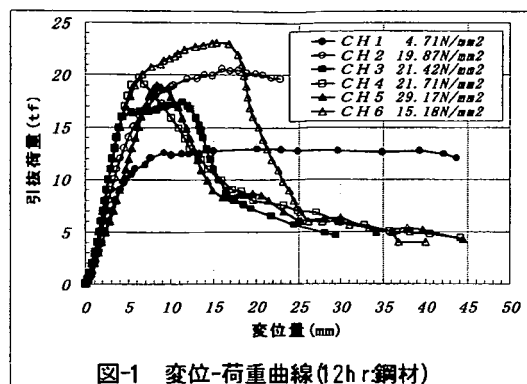


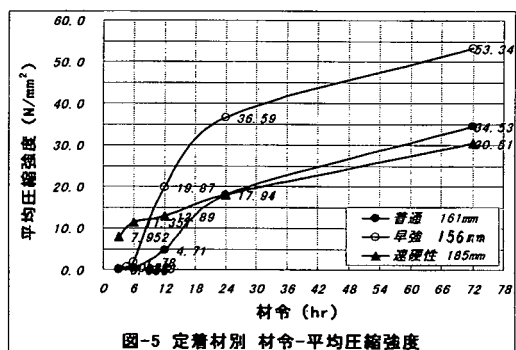
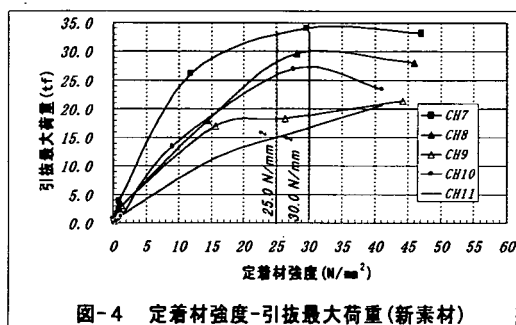
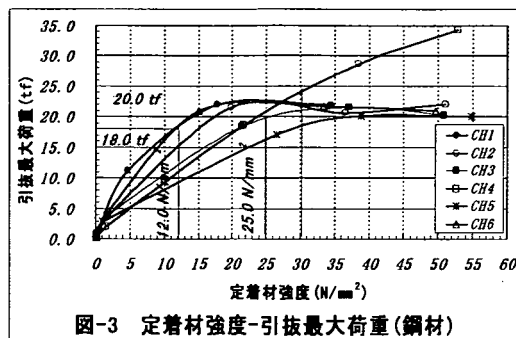
表-1 使用材料一覧表

記 号	使用ボルト材料					定 着 材	
	材 質	規格	径	降伏耐力	破断耐力	モルタル種別	フロー値
CH1	ねじり鋼	SD510	T024	18.3tf	24.7tf	普通	161mm
CH2	ねじり鋼	SD510	T024(M24)	18.3tf	24.7tf	早強	156mm
CH3	ネジ鋼(新素材)	SD390	D25	20.2tf	28.9tf	早強	144mm
CH4	鋼材(鋼)	SD565	D25(M24)	24.2tf	32.5tf	早強	158mm
CH5	ネジ鋼(新素材)	SD700	D19	20.05tf	24.0tf	早強	158mm
CH6	中空ロックボルト	S45C	φ28.5	20.01tf	25.01tf	早強	151mm
CH7	GFRPボルト		φ25.0		40.0tf	早強	158mm
CH8	GFRPボルト		φ25.0		40.0tf	早強	154mm
CH9	GFRP(中空)ボルト		φ25.0		31.0tf	早強	152mm
CH10	CFRPボルト	FC15	φ14.7	30.0tf	30.0tf	早強	151mm
CH11	AFRPボルト	FA15	φ14.7	24.0tf	24.0tf	早強	153mm

GFRP:ガラス繊維プラスチック補強 CFRP:炭素繊維プラスチック補強 AFRP:アラミ繊維プラスチック補強

また、各図の凡例に示した数値は、各材令における定着材の一軸圧縮強度試験により得られた定着材の強度(3個の平均値)である。

これらの図より、定着長を35cmとした引抜特性試験結果から以下のことが確認された。



(1)鋼材ロックボルト

- ① 表面形状の違いにより、引抜荷重がピークに達した後急激に低下するものと、そうでないもの(靱性が高い)があることが確認された。(図-1参照、あくまで今回の試験条件下(埋込長: 35cm)におけるものであり、注意を要する。)
- ② 定着材強度が $12.0\text{N/mm}^2 \sim 25.0\text{N/mm}^2$ 程度に達すれば、母材の降伏耐力に相当する引抜耐力が得られる。(図-3 参照)ただし、ボルト径が細いもの(CH5-D19)は、より高い定着材強度が必要となる。
- ③ 定着材の強度 10N/mm^2 で引抜耐力 10tf が得られれば、所定の耐力発現が期待できる。(図-3参

照 ただし、CH5・D19を除く)

(2)新素材ロックボルト

- ①各種の繊維を素材とする材料には、明確に高い靱性を示すものは見あたらないが、径の違いによりピークに達した後の引抜荷重の低下状況に、差異が生じる傾向がみられた。(図-2 参照)
- ②定着材強度が $25.0\text{N}/\text{mm}^2 \sim 30.0\text{N}/\text{mm}^2$ 程度に達すれば、母材の破断耐力の8割に相当する引抜耐力が得られる。(図-4 参照 ただし、CH9、CH11 は母材の一部破損等により試験値が小さい。)
- ③定着材の強度 $25 \sim 30\text{N}/\text{mm}^2$ が得られる時期は、普通モルタルでは42hr 以上必要とするが、
- ④早強モルタルを使用すれば $15 \sim 20\text{hr}$ 程度で得られる。(図-5 参照)

3. 2 比較検証試験結果

引抜特性試験(室内)の結果と同様に、実物大(長さ)のロックボルトを用いた比較検証試験の、材令6, 12時間における試験結果について、変位と荷重の関係をボルト種別ごとに整理したものを図-6～ 図-7、各材令で得られた定着材の圧縮強度と引抜試験によって得られた引抜耐力の関係をボルト種別ごとに整理したものを図-8 に示す。

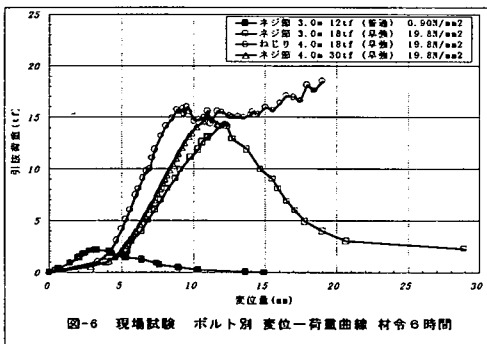


図-6 現場試験 ボルト別 変位-荷重曲線 材令6時間

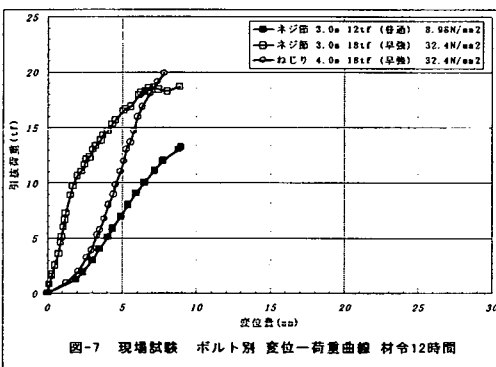


図-7 現場試験 ボルト別 変位-荷重曲線 材令12時間

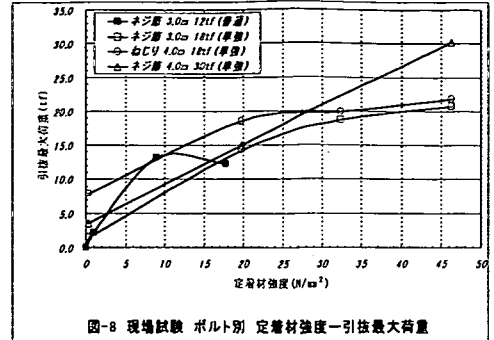


図-8 現場試験 ボルト別 定着材強度-引抜最大荷重

これらの図より、定着長を実物大とした引抜検証試験(現場試験)結果から、以下のことが確認された。

(1)現行ロックボルト

- ① 耐力(12～18tf)の効果発現には、定着材の強度 $8 \sim 18\text{N}/\text{mm}^2$ 程度が必要である。(図-8参照)
- ② 定着材の強度 $8 \sim 18\text{N}/\text{mm}^2$ が得られる時期は、普通モルタルで $15 \sim 24\text{hr}$ 程度である。(図-5 参照)

(2)高耐力ロックボルト

- ①耐力(27～30tf)の効果発現には、定着材の強度 $40 \sim 45\text{N}/\text{mm}^2$ 程度が必要である。(図-8参照)
- ②定着材の強度 $40 \sim 45\text{N}/\text{mm}^2$ が得られる時期は、普通モルタルでは72hr 以上必要とするが、
- ③早強モルタルを使用すれば32～45hr 程度で得られる。(図-5参照)

4. 試験結果の比較と考察

4. 1 ロックボルトの表面形状と引抜耐力

室内試験の結果、定着材の強度が概ね $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以下の場合に於いては、表面形状の違いにより、引抜荷重がピークに達した後急激に低下するものと、そうでないもの(靱性が高い)があることが確認された。(図-1 参照)この傾向は、現場試験によっても同様に確認された。(図-6 参照)

これを、実際のロックボルト工におきかえて考えると施工後定着材の強度が十分に発現しない時期に、大きな変位が発生するような地山に施工されたロックボルトについては、地山の変位に追従し十分効果を発揮するものと、地山の変位に追従出来ずにその効果を損なう恐れのあるものとに分かれることがあるものと考えられる。

4. 2 定着材の強度発現と引抜耐力

現在 J H において実施されているロックボルト工の引抜試験は、実際に施工されたロックボルトを用いて施工後 3 日で実施することとされている。図-5 の定着材材令と定着材の一軸圧縮強度の関係から、施工後 3 日の段階では、定着材の強度は一般に用いられている普通モルタルであっても 35N/mm^2 に達しており、図-3 及び図-8 から分かるとおり 1 本(高耐力: 30tf)を除き母材耐力を上回っており、全面定着によるロックボルト工の作用効果はほとんど発現している。

それぞれのロックボルト工の母材耐力と同程度の引抜耐力発現に必要な定着材強度を推定(図-8 より)すると

- ・ネジ節 12tf 3.0m : 8N/mm^2
- ・ネジ節 18tf 3.0m : 30N/mm^2
- ・ねじり 18tf 4.0m : 20N/mm^2
- ・ネジ節 30tf 4.0m : 45N/mm^2

程度以上となり、ねじり棒鋼に対しネジ節異形棒鋼がより定着材の強度を必要とするものと判断された。

室内試験及び現場試験とも定着材強度 10N/mm^2 程度付近での試験値が無く、断定的なことは言えないが定着材強度 20N/mm^2 程度までは引抜耐力も定着材の強度発現に応じた伸びを示すものの、それ以降の伸びは鈍化するものと推定される。

4. 3 ロックボルト工の定着長と引抜耐力

(1) ねじり棒鋼

同一材料を用いた定着長と引抜最大荷重の関係を比較するため、室内試験(定着長 35 cm)と現場試験(定着長 4.0m)の定着材強度-引抜最大荷重を図-9 に示す。

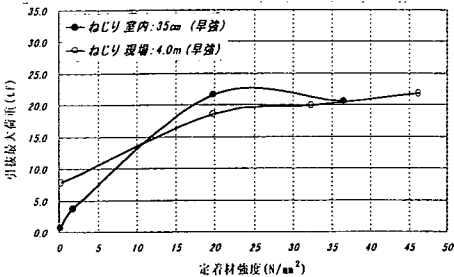


図-9 定着長別 定着材強度-引抜最大荷重(ねじり棒鋼)

これによると、定着材強度が十分でないときは定着長による形状効果(長さに比例して引抜最大荷

重も大きい)が確認でき、その比は、

室内試験 $35\text{ cm}-0.71\text{tf}/0.16\text{N/mm}^2$

現場試験 $400\text{ cm}-7.85\text{tf}/0.32\text{N/mm}^2$

となり、長さの比が $1:11.4$ であるのに対し、引抜最大荷重の比は $1:5.5(4.46:24.5)$ に留まっている。

(2) ネジ節異型棒鋼

ねじり棒鋼同様、同一材料(現場 3.0m 普通は耐力 12tf で径が $\phi 22\text{ mm}$)を用いた定着長と引抜最大荷重の関係を比較するため、室内試験(定着長 35 cm)と現場試験(定着長 3.0~4.0m)の定着材強度-引抜最大荷重を図-10 に示す。

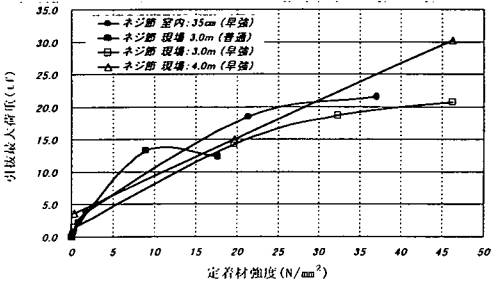


図-10 定着長別 定着材強度-引抜最大荷重(ネジ節異形棒鋼)

これによると、定着長の長さによる形状効果の範囲は明確でないが、定着材強度 2N/mm^2 程度以下の範囲で数値的には算定でき、その比は、

室内試験 $35\text{ cm}-0.79\text{tf}/0.16\text{N/mm}^2$

現場試験 $300\text{ cm}-1.50\text{tf}/0.32\text{N/mm}^2$

現場試験 $400\text{ cm}-3.61\text{tf}/0.32\text{N/mm}^2$

となり、長さの比が $1:8.6:11.4$ であるのに対し、引抜最大荷重の比は $1.1:1:2.4(5.1:4.7:11.3)$ であり、今回の試験でネジ節異型棒鋼について

① 35cm と 3.0m では、はっきりとした形状効果は確認できなかった。

② 3.0m と 4.0m では、定着材強度 20N/mm^2 以下の範囲で引抜最大荷重に差が生じている。

よって、ネジ節異型棒鋼の形状効果についてはさらに検討すべきであると考えられる。

室内試験と現場試験を比較した結果、ロックボルトの種別毎に長さによる形状効果の表れ方が異なることから、これまで実施されていない定着材強度や長さについての試験による確認も今後の課題である。

5. ま と め

今回実施した、室内試験(引抜特性試験)結果及び現場試験(比較検証試験)より考察した主な項目を以下にまとめる。

(1) 表面形状と引抜特性に関するまとめ

①ロックボルトの表面形状の違い(凹凸の程度、パターン)より、定着材の強度が十分に発現されるまでは、引抜荷重がピークに達した後急激に低下する材料(ネジ節、異型、新素材)と、そうでない材料(靱性が高い:ねじり)がある。

②ロックボルトの表面形状の違いにより、母材耐力に相当する引抜最大荷重を得るために必要な定着材の強度が異なり、鋼材ロックボルトの場合、ねじり棒鋼に対しネジ節異形棒鋼がより定着材の強度を必要とするものと判断された。

(2) 定着長と引抜最大荷重に関するまとめ

①室内試験等において定着長を実物より相当程度短くして実施する場合は、ロックボルトの種類により、長さによる形状効果の表れ方が異なり注意を要する。

②母材耐力が現行程度(12～18tf)の材料を使用した場合、定着材の強度 10～25N/mm² 程度を超える範囲では定着長にほとんど関係なく、ほぼ母材耐力に相当する引抜耐力(引抜最大荷重)が得られる。

③ロックボルト工の引抜最大荷重は、定着材の強度が十分に発現した場合、定着長にはあまり左右されなことが今回の室内試験と現場試験の比較から確認された。

(3) 定着材の品質管理規定に関するまとめ

①引抜耐力に関する規定値:施工後3日で95kN(ボルトの降伏点耐力110kN)、150kN(同170kN)は、定着材の強度発現(35N/mm² 程度以上に相当)が十

分期待できる時期の規定であり、余裕のある規定値となっており、品質の一部分を評価しているに過ぎないと言える。(出来形を保証するものではない。)

②本来、全面定着方式のロックボルト工の定着材は、ボルトの腐食を防止する役目もあり、施工品質は、定着材の完全充填と強度発現の確認により確保されるべきものであり、これらを簡便で確実に評価する手法(非破壊検査法等)の確立が必要である。

6. おわりに

本文では、ロックボルト工に関する設計・施工管理要領の一部改訂の基礎資料を得ることを目的とした一連の試験結果を報告してきたが、内容の一部については既に要領改訂(平成9年12月:定着材のフロー値・強度及び引抜耐力に関する規定値の見直し、長さ検査法の導入)に反映されており、一定の成果は得られたものと考えられる。しかしながら、設計要領にも示されるとおりトンネルの支保における、ロックボルト工の作用効果はさまざまであり、効果を十分に発揮させるためには施工品質の確保・管理を確実な手法により実施していかなければならない。

今回の一連の試験を通じて、引抜試験だけでは施工品質の確保・管理のわずかな一面を評価しているに過ぎないことが分かってきた、このことを念頭に置き今後は、これに変わる評価方法(非破壊検査法)の検討も含め、より合理的・経済的なロックボルト工のあり方、簡便でより確実な品質管理手法の確立に向けた、検討を進めていくこととしたい。

最後に、一連の試験の実施にあたり協力頂いた関係者に、感謝の意を表し本文の結びとする。

「参考文献」

- 1) 日本道路公団. 土木工事共通仕様書. 平成9年10月
- 2) 日本道路公団. 設計要領第三集. 第9編トンネル(建設編). (1)トンネル本体工. p66～p77. 平成9年10月
- 3) 日本道路公団. トンネル施工管理要領(本体工編). 平成9年12月
- 4) 木曾伸一. 岡本武久. 吉塚守. ロックボルト工の施工品質について. 第40回業務研究発表会論文集(その1) p352. 日本道路公団. 平成10年6月
- 5) セメントの物理試験方法. J I S R 5201 -1992
- 6) 日本道路公団. 日本道路公団試験方法. ロックボルトの引抜試験方法. J H S 705-1992. 平成4年4月